

in Debru, Claude et Viennot, Laurence (éds.), *Enquête sur le concept de causalité*, Collection « Sciences, histoire et société », Presses Universitaires de France, Paris, 2003, p. 85-114.

La notion de déterminisme en physique et ses limites[□]

Michel PATY*

RESUME : L'idée de déterminisme, proposée pour étendre et généraliser la causalité physique, ajoutant en particulier la considération des *conditions initiales*, se constitua dès lors comme la référence idéale et considérée comme indépassable de toute connaissance scientifique. Cet idéal devait toutefois se voir dépassé dans plusieurs directions. D'une part, la causalité physique classique se transforma en *causalité relativiste*, comportant des restrictions sur les possibilités des rapports spatio-temporels et suscitant, avec la relativité générale, l'idée de *complétude théorique*, méta-concept qui permet de formuler des conditions internes de perfectionnement théorique. D'autre part, le déterminisme proprement dit devait connaître des limitations de sa portée en physique classique même, avec la considération des systèmes dynamiques «non linéaires», déterministes, mais dont le comportement peut être totalement *non-prévisible* à terme. Enfin, la causalité et le déterminisme se sont vus remis radicalement en question avec l'élaboration de la physique quantique. Le sens exact de ces remises en cause est directement lié aux questions d'interprétation de la théorie quantique : *équation causale et problème de la « réduction » de la fonction d'état*, d'un côté, *prédictions probabilistes*, d'un autre côté. Les deux aspects se retrouvent dans la question de la limitation des représentations spatio-temporelles et de sa signification du point de vue théorique. Il faut donc concevoir les problèmes d'interprétation de la théorie quantique en termes du rapport entre la causalité, le déterminisme, et les *grandeurs qui portent les contenus physiques effectifs*. On est ainsi amené à s'interroger sur un sens directement physique des grandeurs mathématiques de la théorie et, si un tel sens est assignable, à considérer les catégories en question par rapport aux concepts théoriques réellement appropriés, avec comme effet de les « remettre sur leurs pieds ». Cela est du moins possible pour la *causalité*, ainsi que pour la *complétude*. Quant au déterminisme, il ne peut être, dans sa formulation usuelle, que statistique, et reste ainsi très en-deçà des possibilités des perspectives théoriques. Ces transformations laissent entrevoir l'impératif d'une autre catégorie, plus fondamentale qu'elles car indépendante des choix conceptuels et théoriques, et pourtant souvent omise dans les débats : celle de *nécessité*, régulatrice des autres catégories et systèmes de concepts.

PLAN

1. Introduction. Causalité et déterminisme en physique classique.
2. L'idéal déterministe : la causalité plus les conditions initiales.
3. Les resserrements de la causalité relativiste ou le point de vue de l'invariance.

[□] Ce travail et celui, mentionné dans le texte, sur la causalité, auquel il fait suite, ont été présentés comme exposés sous le titre « Causalité et déterminisme en physique classique, relativiste et quantique. Tribulations et différences » : à la *Journée « Causalité et relation fonctionnelle » de l'Ecole Doctorale Savoirs Scientifiques*, Université Paris 7-Denis Diderot, le 13 mars 2002 ; et au *Séminaire « Réalisme scientifique et causalité »*, Centre de philosophie des sciences, Institut Supérieur de Philosophie, Université Catholique de Louvain (Be), le 15 mars 2002. Je remercie de leur intérêt, et pour des discussions sur le sujet, Claude Debru, Michel Ghins et Laurence Viennot.

* Directeur de recherche au CNRS, Equipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot. Adresse postale : Centre Javelot, 2 Place Jussieu, F-75251 Paris-Cedex-05.
E-mail/courriel : paty@paris7.jussieu.fr

4. Les systèmes dynamiques non linéaires, ou le déterminisme dépassé par la structuration causale.
 5. La physique quantique ou le rétablissement de la causalité différentielle et la limitation du déterminisme.
 6. Conclusion. L'exigence de nécessité.
- Références bibliographiques.

1. INTRODUCTION. CAUSALITE ET DETERMINISME EN PHYSIQUE CLASSIQUE.

Les notions ou catégories de *causalité* et de *déterminisme* ont accompagné la formation des sciences modernes, et en premier lieu celle de la physique. L'usage courant de nos jours tend souvent, à tort, à les confondre, dans les remises en cause qui en sont faites en physique même. Il nous est apparu souhaitable de tenter de clarifier ces notions de manière synthétique et comparative, en suivant leurs premières mises en œuvre et leurs conceptualisations respectives, décalées au long de l'histoire de la physique, qui accompagnent la mathématisation de cette science, ainsi que les problèmes de compréhension et d'interprétation auxquels elles ont donné lieu : en somme, leurs tribulations. On peut distinguer plusieurs étapes dans l'histoire conjointe de la causalité et du déterminisme : la constitution de la causalité physique en mécanique et en physique classique ; la formulation ultérieure du déterminisme au sens laplacien, et la pensée d'un idéal déterministe étendu de la mécanique à la physique et à la science en général ; puis les modifications et les critiques subies par ces notions, notamment avec la relativité et la physique quantique.

Nous avons examiné, dans un travail complémentaire de celui-ci, la genèse de la première de ces notions, la *causalité physique*¹. La causalité s'est établie comme catégorie scientifique avec la construction de la causalité différentielle de la physique, et d'abord de la mécanique classique, autour du *concept de temps instantané et continu*, variable principale de la dynamique. Au soubassement philosophique de cette notion se tiennent les idées de relation d'ordre et de succession temporelle², et ces deux aspects sont présents dans l'explicitation du *mode d'action de la cause* qui provoque le *changement de mouvement*. On peut voir dans la seconde loi du mouvement de Newton, dans les *Principia*, le premier pas vers l'expression de la causalité dans la loi du mouvement ; toutefois cette interprétation est rétrospective, la conception explicite de Newton étant différente. Ce dernier mettait, en effet, de côté la considération du mode d'action physique, et donc des causes physiques, dans le changement de mouvement, en les remplaçant par le recours au concept de force, qu'il ne voulait justifier que « mathématiquement ».

La considération expressément physique de la « cause du changement de mouvement » se trouve en réalité dans le *Traité de dynamique* de d'Alembert, et elle est étroitement liée au projet de ce dernier de fonder la dynamique sur les seules grandeurs qui décrivent le mouvement et ses changements (changements

¹ Nous renvoyons à cette étude, « Genèse de la causalité physique » (Paty [à paraître, d]), dont le présent travail est la suite directe.

² Claude Debru, « Causalité, temporalité, fonction. Kant, Helmholtz, Mach » (Debru [ce volume]).

qui étaient, à ses yeux, « le seul problème de la dynamique »³. Le mode de l'action causale pouvait être décrit, selon d'Alembert, de manière purement physique, sans recours à des causes « métaphysiques », par l'identification du *mode d'action*, au moment même où l'action a lieu, avec l'*effet* de cette action, qui est le changement de mouvement. Cette conception ne pouvait être effective qu'avec l'expression différentielle des variables de la dynamique, et notamment du temps, et de son « élément », dt , durant lequel se produit le changement, dans une représentation géométrique des variations des grandeurs spatiales en fonction du temps.

On peut considérer que cette construction (géométrique) par d'Alembert de la causalité physique (temporelle et différentielle) et de la signification physique corrélative des équations du mouvement correspond à la conception que la physique se ferait ensuite durablement, à partir de Lagrange, qui l'adopta dans sa *Mécanique analytique*, ouvrage qui devait constituer la référence fondamentale de toutes les élaborations ultérieures de la physique mathématique et théorique⁴. Cependant, avec la mise en forme purement algébrique (analytique) de la théorie du mouvement mécanique, les considérations sur le mode d'action de la cause n'avaient plus besoin d'être explicitées, étant devenues inhérentes à la signification physique de l'élément différentiel de temps. Avec Lagrange, la causalité (physique) était donnée dans la forme même des équations, sans plus de nécessité d'interprétation géométrique de l'élément dt fixant des conditions d'utilisation⁵. C'est dans ce sens que la physique théorique tout entière la considérerait, jusqu'à la physique quantique, comme nous le verrons plus loin.

Le second moment, par lequel nous commençons cet exposé, concerne l'idée de déterminisme, qui acquiert un sens précis au XIX^e siècle, ce sens se recouvrant pour une bonne part avec le « déterminisme laplacien ». Ce dernier ajoute à la causalité différentielle la considération des *conditions initiales*, supposées données : il affirme dès lors l'aptitude de principe à déduire le passé ou le futur dans leur ensemble à partir de ces éléments premiers. La causalité physique comme le déterminisme laplacien ont d'abord « fonctionné » dans la formulation de la physique avant de recevoir leur dénomination explicite. En recevant ces notions méta-théoriques, les scientifiques sont souvent tombés dans la tentation d'y voir des catégories absolues et intemporelles, en les associant indissolublement, oubliant leurs différences au point de les confondre, soit pour les prôner comme indépassables, soit pour souligner que leurs échecs ou leur caducité impliquent des « renoncements » de la pensée. Les physiciens du domaine quantique parlent, en effet, souvent indifféremment de *causalité* et de *déterminisme* quand ils évoquent les difficultés des conceptions classiques avec la

³ Jean D'Alembert, *Traité de dynamique* (Alembert [1743]), Préface.

⁴ Toutefois, à la différence de d'Alembert, Lagrange faisait usage du concept de *force appliquée* à un système physique (d'Alembert ne retenait, pour sa part, que la *force accélératrice* ou *motrice*, définie par le changement même du mouvement). Mais cette définition de la force, traduite dans l'équation d'Euler-Newton ($F = m.\gamma$, m étant la masse et γ l'accélération, dérivée seconde par rapport au temps de la variable d'espace), était désormais « métaphysiquement neutre ».

⁵ Sur cet aspect chez d'Alembert, voir Michel Paty, « L'élément différentiel de temps et la causalité physique dans la dynamique de Alembert » (Paty [à paraître, c]), et « Genèse de la causalité physique » (*op. cit.*).

mécanique quantique, à propos de la signification probabiliste attachée à la « fonction d'état » (ou « fonction d'onde »), comme si le fait qu'une description théorique fût exprimée en termes de probabilités impliquait une rupture avec le déterminisme et la causalité, qui concernent tous deux des systèmes physiques individualisables et identifiables. Mais ceci appartient déjà à notre troisième période des tribulations.

Quoiqu'il en soit, les deux ont en physique des significations distinctes, même si leurs tribulations s'accompagnent solidairement, le *déterminisme laplacien* pouvant être vu comme une systématisation ou une hypostase de la causalité *newtonienne*.

Nous considérerons ensuite la troisième période, qui fut celle d'une critique et d'une remise en cause de la causalité et du déterminisme, sans que les physiciens aient abandonné pour autant l'ambition d'une description scientifique du domaine concerné. Des deux notions, ce fut surtout la première, la *causalité*, qui connut une transformation importante avec la connaissance des actions physiques retardées et non plus instantanées, occasionnée par la théorie électromagnétique, et dont la théorie de la relativité restreinte devait fournir les raisons théoriques. La *causalité relativiste* impose, en effet, des restrictions sur les possibilités des rapports spatio-temporels pour des événements physiques, avec diverses implications, qui deviennent plus contraignantes avec la relativité générale, cette dernière suscitant l'idée de *complétude* théorique. La cosmologie établie comme science ajoute à ces notions, causalité, déterminisme, complétude, ses considérations propres qui tendent à les faire passer du statut de catégories pour des théories physiques à celui de propriétés générales de l'univers matériel, c'est-à-dire de la nature même.

En même temps que la physique, classique et relativiste, précisait ainsi ces notions, leurs limites suivant nos conceptions apparaissaient dans d'autres domaines. Une première faille dans la signification et la portée du déterminisme au sens usuel apparut avec la considération des systèmes dynamiques «non linéaires», *déterministes* mais au comportement *non-prédictible* à terme, en raison de l'amplification des petites différences des conditions initiales. Nous verrons comment la physique a pu proposer d'autres relations contraignantes que celle du déterminisme pour une trajectoire, comme celle de *stabilité structurelle* d'une famille de trajectoires, qui qualifie étroitement un système dynamique donné. Mais c'est avec la physique quantique que les idéaux de causalité et de déterminisme, tels qu'ils avaient pu être conçus jusqu'alors, connurent leur plus grande «crise», voire leur mise en échec, encore que ce fût selon des modalités différentes pour la causalité et pour le déterminisme. On sent que l'interrogation sur les problèmes posés par cette remise en cause doit porter directement sur *le rapport entre la causalité, le déterminisme, et les grandeurs physiques* invoquées. Les grandeurs en jeu en physique quantique sont de deux sortes : celles qui correspondent à l'observation et se ramènent à des grandeurs classiques (munies des limitations de leur utilisation quantique), et celles qui figurent dans la théorie, dont la forme mathématique permet d'établir des relations qui correspondent aux contenus physiques effectifs, ceux des phénomènes quantiques. Les premières ont longtemps été jugées plus physiques que les autres (au nom d'un primat de l'observation sur l'abstraction), mais ce sont cependant les autres qui sont

causales et relationnelles. Cela pourrait indiquer un renversement à opérer : comprendre comme le plus physique (et réel) ce qui est causal et relationnel, fût-il plus abstrait ; l'autre, immédiatement donné, étant auxiliaire et circonstanciel...

2. L'IDEAL DETERMINISTE : LA CAUSALITE PHYSIQUE PLUS LES CONDITIONS INITIALES.

Le mot « déterminisme » est d'usage relativement récent : on le trouve dans certains textes de philosophes allemands du XIX^e siècle, pour exprimer une idée qui était déjà présente, en fait, sous d'autres dénominations, comme prédéterminé ou prédéterminisme (« *praedeterminismus* »), et en particulier chez Leibniz (*détermination* et *raison déterminante*, « *praedelineatio* »)⁶. La doctrine de la nécessité de Leibniz sur l'imbrication des causes et des effets se place sous le signe de la *raison suffisante* (qui fait que les choses sont telles qu'elles sont et non autrement), et il est vrai que cette dernière sous-tend la plupart des conceptions qui se réclament, avec ou sans la terminologie précise, du déterminisme (même si Claude Bernard s'oppose aux conceptions de Leibniz au nom de la liberté de l'action humaine, que Leibniz d'ailleurs ne niait pas)⁷. La *raison suffisante* sous-tend, en tout cas, la déclaration de Pierre-Simon Laplace qui serait plus tard prise pour illustrer le sens le plus précis retenu pour le *déterminisme*, celui du « *déterminisme laplacien* », auquel nous allons venir. Sur ce sens et sur ce terme, qui sont devenus familiers aux scientifiques et aux philosophes du XX^e siècle, les auteurs des dictionnaires philosophiques de référence, ceux d'André Lalande et de Paul Foulquié, restent curieusement muets⁸. C'est peut-être parce que Laplace, dans son texte devenu célèbre, n'utilise pas le mot « déterminisme », qui n'entrera que plus tard dans la langue⁹. Pourtant, il est clair que la déclaration de Laplace est en arrière-fond des conceptions de deux des principaux scientifiques français à prôner le déterminisme dans le dernier tiers du XIX^e siècle, Claude Bernard, physiologiste, et Henri Poincaré, mathématicien et physicien, tous deux savants-philosophes. C'est peut-être aussi que l'usage de l'expression « déterminisme laplacien » s'est répandu surtout dans le courant du XX^e siècle et d'ailleurs par antithèse, pour désigner ce à quoi la physique quantique a conduit à opposer de fortes objections, comme nous le verrons en terminant.

⁶ Gottfried W. Leibniz, *Théodicée*, 1 (Leibniz [1710]), et *Nouveaux essais sur l'entendement humain* (Leibniz [1705]), 2. Voir André Lalande, *Vocabulaire technique et critique de la philosophie* (Lalande [1926]1980), p. 222-223.

⁷ Claude Bernard, *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*, (Bernard [1879-1885]), vol. 1, p. 55-60. Leibniz préservait cette liberté, pourvu qu'on aie la connaissance des phénomènes (voir, par exemple, sa *Théodicée*).

⁸ A. Lalande, *Vocabulaire...*(*op. cit.*), et Paul Foulquié, *Dictionnaire de la langue philosophique*, (Foulquié [1962]). Ce sens est bien entendu présent dans les ouvrages et dictionnaires plus récents.

⁹ Très utilisé par Claude Bernard dès son *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (Bernard [1865]), il n'entrerait dans le *Dictionnaire de l'Académie française* qu'en 1878.

Avant de rappeler la conception exposée par Laplace du déterminisme avant la lettre, il est intéressant de signaler qu'une préfiguration très voisine s'en trouve exprimée plus de soixante ans avant, dans un article de l'*Encyclopédie* dû à la plume de d'Alembert. D'Alembert, qui eut Laplace pour disciple, et qu'il inspira tant pour l'astronomie théorique (notamment par ses *Recherches sur la précession des équinoxes* et ses *Recherches sur divers points importants du système du monde*) que par ses *Doutes et questions sur les probabilités*, qui incitèrent Laplace à approfondir la théorie des probabilités notamment en vue de son application aux phénomènes physiques¹⁰. Le titre même de l'article qui contient cette réflexion est significatif, car il évoque, sinon les probabilités qui seront au soubassement de la conception de Laplace, du moins le hasard (premier objet, chronologiquement, de la théorie des probabilités), puisqu'il s'agit de l'article « Fortuit » (classifié par l'auteur comme relevant de la métaphysique)¹¹.

La question du hasard et de la causalité avait beaucoup préoccupé les contemporains (notamment Daniel Bernoulli et Euler), et d'Alembert lui-même, au sujet des conclusions que l'on pouvait tirer de coïncidences ou conjonctions, fortuites en apparence, comme la coplanarité (dans le plan de l'écliptique) des orbites des planètes du système solaire et leur même sens de rotation autour du Soleil. La probabilité que ce fût là l'effet du hasard était très faible, quasiment nulle, et c'était donc, pour d'Alembert, qu'il devait y en avoir une cause, que nous ne connaissons pas. Comme on le sait, c'est à Laplace qu'il reviendrait de tirer parti de ces coïncidences en les supposant, lui aussi, causales, et en élaborant à partir d'elles son « hypothèse cosmogonique » ou théorie de la nébuleuse planétaire dont les parties se condensent sous l'action de la gravitation¹².

Sur la question, mise au concours par l'Académie de Berlin, de savoir « si les lois du mouvement des corps sont de nature *nécessaire ou contingente* », d'Alembert se prononçait sans équivoque pour la première réponse. Les faits, même les plus empiriques, recouvraient, à ses yeux, un caractère de nécessité cachée, dont une connaissance ultérieure établirait le caractère rationnel. Il écrivait dans le *Discours préliminaire de l'Encyclopédie* : « L'Univers, pour qui saurait l'embrasser d'un seul point de vue, ne serait, s'il est permis de le dire, qu'un fait unique et une grande vérité. »¹³ Il précisait aussi, dans « Elémens des sciences », l'un de ses grands articles de l'*Encyclopédie* sur la connaissance, que ce point de vue (qui serait celui de l'intelligence suprême, c'est-à-dire de Dieu) ne peut être celui de l'homme, qui ne peut avoir cette vue immédiate d'une totalité indivisible et « aurait besoin de parcourir [les objets de cette totalité] l'un après l'autre, pour en acquérir une connaissance détaillée »¹⁴. Il est utile d'indiquer, dès ici, une

¹⁰ D'Alembert, *Recherches sur la précession des équinoxes* (d'Alembert [1749]) ; *Recherches sur différents points importants du système du monde* (D'Alembert [1754-1756]) ; « Doutes et questions sur les probabilités » (D'Alembert [1767]). Voir M. Paty, « D'Alembert et les probabilités » (Paty [1988]). Laplace publia en 1774 son « Mémoire sur les probabilités des causes par les événements » (Laplace [1774]), dans lequel figure la formule de Bayes-Laplace.

¹¹ D'Alembert, « Fortuit » (D'Alembert [1757]) : « Fortuit (Métaphys.)... ».

¹² Laplace, *Traité de mécanique céleste* (Laplace [1799-1825]), et *Exposition du système du monde* (Laplace [1796]). Kant avait proposé avant Laplace une hypothèse dans le même sens : Kant, *Histoire générale de la nature et théorie du ciel* (Kant [1755]).

¹³ D'Alembert, *Discours préliminaire de l'Encyclopédie* (D'Alembert [1751]).

¹⁴ D'Alembert, « Elémens des sciences » (D'Alembert [1755]).

différence fondamentale avec la conception de Laplace : la conscience, chez d'Alembert, d'une distance irréductible entre le point de vue de la connaissance humaine et la réalité immanente de la nature.

A l'article « Fortuit », donc, d'Alembert commence par déclarer que « tout étant lié dans la nature, les événemens dépendent les uns des autres ; la chaîne qui les unit est souvent imperceptible, mais n'en est pas moins réelle », et il renvoie aussitôt à l'article « Fatalité », dû à la plume de son collègue encyclopédiste l'abbé Morellet, et qui, soit dit en passant, ne fait appel qu'à des considérations naturelles et aucunement à des puissances irrationnelles¹⁵. Il poursuit par une considération qui paraît anticiper, bien que dans un autre contexte, les considérations actuelles sur l'« effet papillon » à propos du « chaos déterministe »... Qu'on en juge : « Supposez un événement de plus ou de moins dans le monde, ou même un seul changement dans les circonstances d'un événement, tous les autres se ressentiront de cette altération légère, comme une montre toute entière se ressent de la plus petite altération essuyée par une des roues »¹⁶. On notera l'image mécaniste, qui nous rappelle que cette réflexion est étayée par les recherches de d'Alembert sur les enchaînements de causalité de la mécanique et de l'astronomie : pour cette dernière, autour de la théorie de l'attraction universelle newtonienne et du traitement du problème des interactions à trois corps par des calculs en séries de perturbation, qui seront portés à une très grande précision par Laplace.

D'Alembert précise ensuite que cette liaison des événements et des choses est mutuelle et totale, rien n'étant négligeable ou sans effet « dans le système général du monde ». Il est clair que cette liaison, qui peut être dite systémique, tient à l'unité de la matière et de la nature, soumise aux mêmes lois générales, ces « lois générales de la nature » (en particulier celles du mouvement), dont l'étude constituait alors la « cosmologie », comme d'Alembert le précise à l'article de l'*Encyclopédie* sous ce titre (c'est un sens post-copernicien, et à une époque où l'on ne pouvait encore imaginer que l'Univers comme totalité serait un jour objet de science)¹⁷.

« Quand même il y auroit des événemens sans effet », continue-t-il, dans l'article « Fortuit », « si ces événemens n'eussent pas existé, ce qui leur a donné naissance n'eût pas existé non plus ; la cause qui les a produits n'eût donc pas été exactement telle qu'elle est, ni par conséquent la cause de cette cause, et ainsi en remontant. » Il prend alors l'exemple (organique cette fois) d'un arbre, ses feuilles et ses racines, dont la plus petite altération modifierait la constitution de l'ensemble. « Cet arbre est l'image du monde. (...) Supposons mille mondes existans à la fois, tous semblables à celui-ci, et gouvernés par conséquent par les

¹⁵ Ce qui indique un sens métaphysiquement neutre de « fatalité », au moins chez certains penseurs du siècle des Lumières (on le trouve aussi chez Diderot), et suscite l'idée que ce sens aura été celui considéré par les auteurs de dictionnaires du XIX^e siècle où figure pour la première fois le mot « déterminisme », et qui le donnent comme l'équivalent de « fatalisme » (ceux de Bouillet, de 1878 et de Franck, de 1844). Mais Foulquié aussi bien que Lalande se contentent de les censurer pour cette identification. Sur l'article « Fatalité » : Morellet [1756].

¹⁶ D'Alembert, « Fortuit », *op. cit.*

¹⁷ Les études sur la formation ou l'évolution de mondes célestes recevraient la dénomination de « cosmogonie », telle celle de Kant et Laplace, et qui est encore utilisée par Poincaré avec ses *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques* (Poincaré [1911]).

mêmes lois ; tout s'y passeroit absolument de même. Les hommes en vertu de ces lois feroient aux mêmes instans les mêmes actions dans chacun de ces mondes ».

A cet endroit, d'Alembert fait intervenir la fiction d'une intelligence supérieure, à l'égal de celle supposée du Créateur (instance que reprendra Laplace : son Observateur omniscient), et dont la fonction, dans son propos, est double. D'une part, elle permet de concevoir l'unicité absolue des enchaînements de causalité identiques, en en faisant voir des séries parallèles ; d'autre part, par opposition entre une vue totale et extérieure, et des vues partielles, finies, mais douées de conscience (du « sentiment intérieur »), elle permet de maintenir l'idée (ou, en un sens, l'illusion ?) de la liberté humaine. Dans les propres termes de d'Alembert : « Et une intelligence différente du Créateur qui verroit à la fois tous ces mondes si semblables, en prendroit les habitans pour des automates, quoiqu'ils n'en fussent pas, et que chacun d'eux au-dedans de lui-même fût assuré du contraire. Le sentiment intérieur est donc la seule preuve que nous ayons et que nous puissions avoir d'être libres ». Laplace, à qui nous en venons maintenant, reprendrait la première fonction.

La déclaration de Laplace qui définit ce qui a été appelé par la suite le « déterminisme laplacien » figure au début de son *Essai philosophique sur les probabilités*, placé comme préface à la seconde édition, de 1814, de sa *Théorie analytique des probabilités*¹⁸. Elle commence par un énoncé de *l'enchaînement causal selon le temps*, c'est-à-dire de la causalité physique au sens de l'expression différentielle du changement de mouvement, étayé par les connaissances acquises en mécanique et en astronomie, et étendu à l'ensemble de tous les corps (et même les « êtres ») de l'Univers : « Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur et comme la cause de celui qui va suivre. »

Intervient alors l'idée d'une « intelligence suprême », sorte d'extrapolation infinie des capacités intellectuelles humaines (comme cela est très explicitement dit un peu plus loin), qui procure le *point de vue d'une connaissance achevée idéale*. « Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la *situation respective* des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. »¹⁹ Notons l'appel à « un instant donné », c'est-à-dire au concept de temps instantané et différentiel, et à l'« analyse », qui donne les équations différentielles causales (expression de la liaison mutuelle des grandeurs dans leurs changements dynamiques) décrivant l'état instantané de l'univers, entre un instant donné (t) et l'instant qui le suit immédiatement dans la continuité ($t + dt$). La mécanique et l'astronomie nous enseignent que l'intégration du système différentiel fournit une *solution définie* ou déterminée si l'on dispose (par l'observation) des valeurs des grandeurs donnant la « situation respective » des constituants du système à un seul instant donné

¹⁸ Laplace, *Théorie analytique des probabilités*, 1^è éd. 1812 ; 2^è éd., 1814 (Laplace [1812]), précédée de l' *Essai philosophique sur les probabilités* (Laplace [1814], p. vi, vii). Ce dernier a été réédité séparément par la suite.

¹⁹ Souligné par moi (M. P.)

quelconque (l'instant présent, où nous vivons, par exemple) : ce qu'on appelle usuellement les « conditions initiales ». Il ne s'agit que d'extrapoler ce résultat, à la portée des « Géomètres » pour des systèmes locaux comme les corps du système solaire, à l'ensemble des objets physiques de l'univers.

Terminons la citation de Laplace : « L'esprit humain offre, dans la perfection qu'il a su donner à l'astronomie, une faible esquisse de cette intelligence. Ses découvertes en Mécanique et en Géométrie, jointes à celles de la pesanteur universelle, l'ont mis à portée de comprendre dans les mêmes expressions analytiques les états passés et futurs du Système du monde. (...) Tous ses efforts dans la recherche de la vérité tendent à le rapprocher sans cesse de l'Intelligence que nous venons de concevoir, mais dont il restera toujours infiniment éloigné ». C'est ici précisément que vont intervenir les probabilités, objet de l'*Essai philosophique* qui débute par ces considérations, et de la *Théorie analytique* dont ce dernier est la préface. La connaissance donnée par l'astronomie, exposée antérieurement par Laplace dans son *Traité de mécanique céleste* et dans son *Exposition du Système du monde*²⁰, n'y est ainsi que rappelée. Malgré sa puissance, elle est limitée dans ses certitudes par toute l'étendue de l'ignorance qui sépare ce que nous savons de la connaissance idéale évoquée. Le rôle des probabilités sera de fournir un palliatif à cette ignorance en nous permettant d'en évaluer le degré à partir de ce que nous savons, et il est possible de le faire très exactement en mettant à profit, là aussi, les ressources de l'analyse, par la *théorie analytique des probabilités*.

L'idée du *déterminisme laplacien* se fonde donc sur celle de *causalité physique*, qu'elle se propose d'étendre et de systématiser en une connaissance globale et absolue à laquelle rien n'échapperait de ce qui existe dans l'univers matériel. Ce projet prit corps sous la double conjonction des progrès de l'astronomie théorique et de la théorie des probabilités.

D'un côté, la causalité physique de la mécanique analytique appliquée à l'attraction universelle, jointe à la maîtrise du calcul en perturbation du problème à trois corps, permettait de mettre en équations le « Système du monde » et, en ajoutant la donnée de conditions initiales, de connaître l'état de ce dernier, avec une précision pouvant être, idéalement, aussi grande que l'on veut. La loi dynamique (la forme de l'attraction de gravitation) étant connue, et la méthode d'analyse mathématique étant dominée (le traitement du problème à trois corps), il suffisait en effet, pour parvenir à une plus grande exactitude, d'étendre le champ des objets pris en compte, et de pousser plus avant le développement en série de perturbation. Cette assurance était confortée par les calculs astronomiques effectifs sur la stabilité du système solaire, laquelle paraissait ressortir de la solution des équations²¹. En d'autres termes, la causalité se voyait étendue et généralisée d'une description locale et partielle à une description générale et

²⁰ Pierre-Simon Laplace, *Traité de mécanique céleste* (Laplace [1799-1825]) ; *Exposition du Système du monde* (Laplace [1796]). Sur le « système du monde » de Laplace, voir Jacques Merleau-Ponty, *La science de l'Univers à l'âge du positivisme. Etude sur les origines de la cosmologie contemporaine* (Merleau-Ponty [1983]), et *Sur la science cosmologique. Conditions de possibilité et problèmes philosophiques* (Merleau-Ponty [2003]).

²¹ Résultat publié dans le troisième volume du *Traité de mécanique céleste*, qui occasionna la réponse célèbre de Laplace à Napoléon Bonaparte (à qui le volume était dédié : vol. 3, 1803), selon laquelle il n'avait pas eu besoin de l'hypothèse de Dieu dans ses équations.

globale, extensible à « l'Univers entier », conçu comme l'ensemble des objets qu'il contient.

De l'autre côté, la possibilité d'estimer exactement les insuffisances de cette description par le recours au calcul des probabilités donnait à la connaissance une garantie de perfectibilité indéfinie. Les probabilités constituent, pour le « déterminisme laplacien », un palliatif à l'ignorance : leur fonction dans la connaissance peut, dans ce sens, être dite subjective, puisqu'elle tient au point de vue de la connaissance partielle d'un sujet. Une connaissance objective idéale devrait s'en passer.

Concluons sur ce point en quelques mots. Le « déterminisme laplacien » se propose en qualification de connaissance totale et absolue, mais pourtant tout idéale : il se place *du point de vue de la connaissance* (parfaite), dont les éléments conceptuels sont ceux de la mécanique analytique, bien établis par elle : l'espace, le temps, la masse et la forme du corps, la trajectoire, l'attraction gravitationnelle... L'« intelligence supérieure » est supposée avoir également recours à eux : ils sont implicitement conçus comme immanents à la nature elle-même, et le *déterminisme* (effectif), bien qu'il soit posé du point de vue de la *connaissance*, est identifié de fait à la *nécessité*, qui serait le « point de vue » inhérent à la nature. La nécessité est en quelque sorte anthropomorphisée. On ne trouve pas, dans ce déterminisme, l'idée que les concepts bien établis de la mécanique (ou de la physique classique) pourraient être insuffisants et remplacés un jour par d'autres, qui modifieraient l'ordre de l'arrangement de nos connaissances.

Ces caractères, propres à la conception répandue du « déterminisme laplacien », n'étaient pas mis en question, ni même analysés comme tels, et ils n'apparaîtraient comme autant de faiblesses qu'avec la mise en évidence des limitations de la physique classique. Au contraire, le déterminisme serait considéré jusque-là comme une clause de la définition de la science elle-même. C'est ce qui apparaît dans les déclarations de Claude Bernard et d'Henri Poincaré, du moins à première vue, car leurs conceptions effectives du déterminisme sont plus nuancées que le déterminisme laplacien au sens strict.

Les causes immédiates des phénomènes, qui ne sont que les conditions de ces derniers, écrit par exemple Claude Bernard dans son ouvrage *La science expérimentale*, « sont susceptibles d'un déterminisme aussi rigoureux dans les sciences des corps vivants que dans les sciences des corps bruts ». Il donne cette précision qu'« il n'y a aucune différence scientifique dans tous les phénomènes de la nature, si ce n'est la complexité ou la délicatesse des conditions de leur manifestation qui les rendent plus ou moins difficiles à distinguer ou à préciser »²². Le déterminisme est ici donné comme synonyme de scientificité (ce qui est aussi une exigence sur cette dernière), et l'argument est dirigé contre les conceptions vitalistes. Citons encore ceci : « Je me propose de démontrer que les phénomènes des corps vivants sont, comme ceux des corps bruts, soumis à un

²² Claude Bernard, *La science expérimentale* (Bernard [1890]), p. 183. Voir aussi de nombreuses autres déclarations de même nature dans *l'Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (Bernard [1865]), dans les *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux* (Bernard [1879-1885]), etc.

déterminisme absolu et *nécessaire* »²³. C'est assez dire que ce déterminisme est avant tout l'expression de l'unité de la matière et le reflet de sa nécessité.

Quant à Poincaré, c'est apparemment sans réserve qu'il se déclarait « déterministe absolu », dans la mesure où il identifiait, comme Claude Bernard, la science et le déterminisme. « La science est déterministe », s'écrie-t-il dans l'un des textes de ses *Dernières pensées* »²⁴ ; « elle l'est *a priori* ; elle postule le déterminisme, parce que sans lui elle ne pourrait être. Elle l'est aussi *a posteriori* ; si elle a commencé par le postuler, comme une condition indispensable de son existence, elle le démontre ensuite précisément en existant, et chacune de ses conquêtes est une victoire du déterminisme ». Poincaré se situait dans l'héritage de Laplace sous les deux directions de la mécanique céleste et de la théorie des probabilités, et l'on peut bien concevoir qu'il acceptât dans une grande mesure la pensée laplacienne d'une hypostase de la causalité physique. Sa position est cependant moins absolue que celle de Laplace, et il laisse à entendre, dans ses textes où il est question du déterminisme des phénomènes physiques de manière précise, que des approximations (sur la description des objets et des phénomènes à un instant donné) et des choix de conventions (de classification de corps presque semblables selon des rapports d'équivalence) sont nécessaires si l'on veut exprimer, pour l'univers, l'influence de son état à un instant donné t sur un phénomène à l'instant immédiatement suivant, $t + dt$.²⁵

La conception du déterminisme de Poincaré est donc atténuée par rapport à celle de Laplace, et la raison essentielle en est qu'il n'identifie pas l'objet de la connaissance et l'objet réel, et professe que le premier est construit par la pensée. D'ailleurs, à la différence de Laplace, il a démontré que la stabilité du système solaire n'est pas acquise et ne peut l'être en toute rigueur²⁶ ; il sait aussi (pour l'avoir également découvert) l'effet de petites variations des conditions initiales sur des systèmes physiques « déterministes », exactement décrits par des équations différentielles, dont l'amplification dans ces dernières peut conduire à des valeurs arbitraires²⁷. Enfin il a connaissance de la théorie des gaz de Boltzmann et sait que les configurations stables d'un ensemble statistique ne sont jamais absolues, et que le « déterminisme statistique » présente d'autant plus d'irrégularités que l'on s'approche davantage du comportement des molécules individuelles.

²³ *Ibid.*, p. 40. Souligné par moi (M.P.)

²⁴ Henri Poincaré, *Dernières pensées* (Poincaré [1913]), chapitre 8 : « La morale et la science ». Comme d'Alembert dans le texte cité précédemment (et comme Claude Bernard), Poincaré maintient la liberté des actions humaines par la conscience : « Il est tout aussi impossible de ne pas agir comme un homme libre quand on agit, qu'il l'est de ne pas raisonner comme un déterministe quand on fait de la science. » (*Ibid.*)

²⁵ Voir, par exemple : H. Poincaré, *La valeur de la science* (Poincaré [1905]1970), chapitre 11 : « La science et la réalité », p. 171.

²⁶ C'est ce qui ressort de son travail sur « Le problème des trois corps et les équations de la dynamique » qui lui valut le Prix du Roi de Suède en 1889 (Poincaré [1890]).

²⁷ H. Poincaré, « Mémoires sur les courbes définies par une équation différentielle » (Poincaré [1881-1886]).

3. LES RESSERREMENTS DE LA CAUSALITE RELATIVISTE OU LE POINT DE VUE DE L'INVARIANCE.

Avec la mécanique newtonienne et la mécanique analytique, la loi de causalité instantanée et différentielle ne donnait pas la direction du temps, puisqu'elles admettaient un espace simultané et une attraction de gravitation instantanée à distance. La direction du temps devait être ajoutée à la théorie, de l'extérieur, par le choix du sens de parcours des planètes sur leurs orbites, donné par l'observation. La théorie électromagnétique, en introduisant en physique les *actions retardées*, fixa le cours du temps d'une manière plus naturelle : les champs électrique et magnétique à propagation de proche en proche de Michel Faraday et la théorie du champ électromagnétique de James Clerk Maxwell imposaient le sens du temps dans les relations de causalité : la cause précédait *nécessairement* l'effet, puisque la vitesse de propagation des champs était finie (sa valeur étant donnée par la vitesse de la lumière dans le vide).

La théorie de la relativité restreinte exprima les contraintes conceptuelles et théoriques de cet état de choses en mettant la mécanique et l'électromagnétisme en conformité entre elles et avec ces contraintes fondamentales. Einstein en donna la forme la plus universelle et « économique » : ces contraintes se résumaient à deux principes gouvernant les phénomènes physiques et la forme de leurs théories : le principe de relativité (pour les mouvements d'inertie), et la constance de la vitesse de la lumière dans le vide. Cela revenait à donner une forme plus large à la relativité des mouvements d'inertie, constatée pour la mécanique : posée comme principe, elle serait désormais entendue comme comprenant aussi l'invariance de la vitesse de la lumière et les lois de l'électromagnétisme. Cette transformation obligeait à modifier les concepts cadres de la physique tels que l'espace et le temps (et donc la vitesse), la masse et l'énergie, etc. La nouvelle cinématique relativiste impliquait le lien de l'espace et du temps en un espace-temps indissociable (l'espace-temps de Minkowski), pour lequel la vitesse de la lumière, limite absolue des vitesses, acquiert le statut universel de constante de structure.

La causalité physique se voyait par là transformée, de causalité temporelle (non relativiste) en causalité spatio-temporelle (relativiste), soumise à la structure de l'espace-temps par une condition sur la distance spatio-temporelle de deux points-événements susceptibles d'être liés causalement : leur quadri-distance doit être négative ($\Delta x^2 - c^2 \Delta t^2 \leq 0$). En effet, leur rapport peut être causal s'ils sont séparés par une distance $x^2 \leq c^2 t^2$, et il est nécessairement non causal pour $x^2 > c^2 t^2$. Autrement dit, les actions causales d'un point (quadri-dimensionnel) d'espace-temps à un autre sont telles que le quadri-vecteur joignant ces points soit intérieur au « cône de lumière », défini par l'équation $x^2 = c^2 t^2$. La région externe du cône de lumière, qui exclut des actions causales, est non physique. Cette propriété relationnelle du temps, qui inclut sa direction, était intégrée dans le concept de temps physique, et non plus laissée à l'observation ou à un choix de convention²⁸.

²⁸ Sur les transformations du concept de temps, voir M. Paty, « Sur l'histoire du problème du temps : le temps physique et les phénomènes » (Paty [1994]).

La théorie de la relativité générale ne fit que caractériser d'une manière plus spécifique la transformation opérée sur le temps et la causalité avec la relativité restreinte, en remplaçant la structure quasi-euclidienne (« plate ») de l'espace-temps de Minkowski par une métrique spatio-temporelle locale, donnée en tout point d'espace-temps par le champ de gravitation en ce point, dû à des sources de masse-énergie. Avec la théorie de la relativité restreinte et générale, la question du déterminisme n'est pas différente de ce qu'elle est en physique classique, sinon par la modification indiquée de la causalité. Nous n'entrerons pas plus avant dans les conséquences, pour des objets particuliers (comme les « trous noirs ») ou pour l'Univers dans son ensemble, des aspects que nous venons d'indiquer, qui nous entraîneraient trop loin.

Il faut cependant évoquer un des prolongements de la théorie de la relativité générale qui intéresse de près la question de la causalité, et qui est la notion de « *complétude* » de la théorie. Cette question est différente de celle du déterminisme, parce qu'elle se pose du point de vue de la théorie elle-même, et non de son application à des objets, voire à l'ensemble des objets de l'Univers.

Le concept de *complétude* a été introduit pour la physique par Einstein, dans divers sens, dont nous n'évoquerons ici que celui qui intéresse la relativité générale²⁹. La complétude caractérise le fait pour une théorie, d'être auto-consistante, en empruntant le moins possible d'éléments à des instances qui lui soient externes (et idéalement aucun). C'est là une perspective sur la structure et la portée d'une théorie physique qui fournit un critère de comparaison entre des théories portant sur un même domaine de phénomènes. Entre plusieurs théories équivalentes pour ce domaine, on choisira de préférence la plus « complète », comme se rapprochant le plus de l'objet qu'elle vise : car elle l'exprime davantage que les autres dans sa *nécessité*.

Einstein a considéré cette notion (qui est plutôt un méta-concept) à propos de la relativité générale, en formulant la condition de *covariance générale*, qui évacuait tout privilège pour des référentiels particuliers : tout choix de ces derniers ne peut être que contingent et arbitraire au regard de la réalité, qui est indépendante du sujet qui la considère ou l'observe. Mais le problème peut être posé pour toute théorie de la causalité physique, et déjà pour la théorie newtonienne de la gravitation. De fait, c'est avec Newton que le programme de la complétude commence en physique, pour Einstein, avec le développement moderne de l'idée de causalité : « La complétude logique du système de Newton réside en ceci que les seules causes d'accélération des masses d'un système, ce sont les masses elles-mêmes »³⁰. Mais la causalité est un concept encore trop rudimentaire en regard de la nature considérée dans sa réalité profonde. Elle juxtapose la loi causale et d'autres données qui en sont indépendantes, comme l'espace et le temps absolus considérés comme des contenants indépendants, les masses et les propriétés des corps, les constantes (comme celle de gravitation), et les conditions initiales. Pour Einstein, d'une manière générale, la contrainte de

²⁹ Par ex., A. Einstein, « Autobiographical notes » (Einstein [1946]. Voir M. Paty, « Sur la notion de complétude d'une théorie physique » (Paty [1988c]) ; *Einstein philosophe* (Paty [1993]), chapitre 10.

³⁰ A. Einstein, « La mécanique de Newton et son influence sur l'évolution de la physique théorique » (Einstein [1927]).

causalité était encore trop limitée : « Je crois, pour ma part », indiquait-t-il, « que les événements qui se produisent dans la nature sont contrôlés par une loi de liaison beaucoup plus stricte et étroite que nous ne le suspectons aujourd'hui, quand nous parlons d'un événement qui est la *cause* d'un autre ». C'est que, pensait-il, dans notre affirmation de causalité, nous séparons un événement du processus tout entier, nous limitant à considérer ce qui se produit sur une coupe dans le temps.³¹

La relativité générale est plus complète que la dynamique gravitationnelle de Newton, mais elle fait subsister à côté du tenseur métrique donné par la théorie le tenseur d'énergie-impulsion dont le contenu est empirique, et elle ne donne pas de justification rationnelle de la constante de gravitation. De plus, elle n'inclut pas les autres champs classiques comme le champ électromagnétique.

Une théorie plus complète serait une théorie plus unifiante et « théoriquement fermée ». A l'horizon du programme de complétude théorique se profile le projet de l'unification et de la simplification de la physique dans son ensemble. Pour Einstein, une théorie du champ *complète*, dans la direction de ses propres recherches, serait une *théorie du champ et de sa source*, qui ne laisserait aucun paramètre sans détermination, et serait capable en particulier d'engendrer ses propres constantes fondamentales. Il résumait ce projet dans cette revendication de principe, tout asymptotique : « Il n'existe pas de constantes *arbitraires* ». Cela signifiait, plus précisément, que « la nature est ainsi faite qu'il est possible de poser logiquement des lois si précisément définies que, à l'intérieur de ces lois, seules des constantes totalement déterminées de façon rationnelle interviennent (et non des constantes dont on pourrait changer la valeur numérique sans pour autant détruire la théorie) »³². Einstein fondait sa conviction qu'un tel programme n'est pas déraisonnable sur sa « foi profonde dans la simplicité, c'est-à-dire dans l'intelligibilité, de la nature ». Mais il avait conscience que les conditions d'un tel programme étaient encore loin d'être atteintes. C'était en tout cas le seul point de vue qui lui semblait valoir vraiment la peine, car il correspondait à celui de la *nécessité du réel*.

On peut considérer que les efforts actuels des physiciens en physique fondamentale pour élaborer des théories quantiques des champs de jauge, plus unifiées, plus englobantes et réduisant le nombre de leurs paramètres libres, vont dans le sens du programme de complétude³³. Curieusement, à première vue, puisqu'il s'agit de théories quantiques, pour lesquels la causalité et le

³¹ A. Einstein, J. Murphy, « Epilogue : a socratic dialogue » (Einstein & Murphy [1932]), p. 104. Voir M. Paty, *Einstein philosophe* (Paty [1993a]), p. 481-482.

³² A. Einstein, « Autobiographical notes » (Einstein [1946]), p. 62-63, souligné par Einstein). Arthur Eddington écrivait, dans un sens voisin : « La nature serait mesurée à sa propre jauge », dans : A. Eddington, *The philosophy of physical science* (Eddington [1939]). La position d'Eddington diffère de celle d'Einstein en ceci qu'il considère que les lois générales, mais aussi particulières, et les constantes fondamentales, peuvent être déduites sur la base de considérations épistémologiques seulement (au sens de *philosophie de la connaissance*), c'est-à-dire que l'on peut en avoir une connaissance *a priori*. C'est là évidemment un *a priorisme* particulier, plus radical que celui de Kant, qui faisait place à la contingence (les lois particulières étant déterminées par l'expérience).

³³ Voir M. Paty, « Sur la notion de complétude... » (Paty [1988c]).

déterminisme classiques ne sont plus valides. Mais il apparaît, en fait, que les théories quantiques, si on les considère sous le point de vue de la théorie même (le point de vue *structurel*), et non sous celui des prévisions sur les grandeurs observables (si l'on veut, sous le point de vue de la *prédiction*, au lieu de celui de la *prévision*), sont beaucoup plus contraignantes que les théories de la physique classique³⁴. Dans ce sens, elles illustreraient bien le point de vue de la complétude contre celui du déterminisme, bien que ce ne fût pas à cette direction-là qu'Einstein ait, pour sa part, pensé, bien au contraire. Mais ceci serait une autre histoire³⁵.

4. LES SYSTEMES DYNAMIQUES NON LINEAIRES, OU LE DETERMINISME DEPASSE PAR LA STRUCTURATION CAUSALE.

Nous ne dirons ici que quelques mots sur les systèmes physiques dits « déterministes » mais qui ne conduisent pas à des prévisions certaines, voire sont totalement imprévisibles. Pour de tels systèmes, qui ne sont pas nécessairement très complexes car le phénomène se présente déjà avec un petit nombre de degrés de liberté (à partir de trois), il suffit de très petites variations dans la définition des conditions initiales pour que des systèmes d'équations causales et déterministes au sens laplacien (les systèmes d'équations différentielles non-linéaires) les amplifient énormément, entraînant la non-prévisibilité³⁶. Ce comportement, mis en évidence par Poincaré dans ses travaux d'astronomie théorique sur le problème à trois corps, étayés sur ses recherches mathématiques sur la résolution des systèmes d'équations différentielles, est apparu correspondre aux situations les plus fréquentes, non seulement en mécanique mais en physique d'une manière générale (ainsi que dans d'autres sciences, de la chimie à la statistique des populations).

Les études, aujourd'hui répandues, de situations de chaos déterministe dans la nature (en physique, en météorologie, etc.), et en particulier la possibilité de les contrôler en laboratoire, à la suite des travaux de David Ruelle et Floris Takens, ont permis de caractériser de manière positive ce type de phénomènes, en dépassant le simple constat de leur imprévisibilité à terme ³⁷.

³⁴ M. Paty, *L'Intelligibilité du domaine quantique* (Paty [à paraître, b]).

³⁵ M. Paty, *Einstein, les quanta et le réel* (Paty [à paraître, a]).

³⁶ Il faudrait se reporter ici aux travaux d'Henri Poincaré : « Sur les problèmes des trois corps et les équations de la dynamique » (Poincaré [1890]) ; de Jacques Hadamard : « Les surfaces à courbures opposées et leurs lignes géodésiques » (Hadamard [1898]) ; de Pierre Duhem : « Exemple de déduction mathématique à tout jamais inutilisable », 2^e partie, chapitre 3, §3, de *La théorie physique. Son objet, sa structure* (Duhem [1906]) ; de George Birkhoff : « Quelques théorèmes sur le mouvement des systèmes dynamiques » (Birkhoff [1912]). Ainsi qu'aux travaux d'autres auteurs, notamment de l'« école russe », qui ont développé les recherches dans cette direction. Je renvoie aux ouvrages suivants : Amy Dahan-Dalmelico, Jean-Louis Chabert, et Karine Chemla (éds.), *Chaos et déterminisme* (Dahan-Dalmelico, Chabert, et Chemla [1992]) ; Tatiana Roque, *Ensaio sobre a gênese das idéias matemáticas: exemplos da Teoria dos Sistemas Dinâmicos* (Roque [2001]).

³⁷ Voir les travaux de : Edward Lorenz, *The essence of chaos* (Lorenz [1993]) ; David Ruelle et Floris Takens, « On the nature of turbulence » (Ruelle et Takens [1971]) ; D. Ruelle, *Hasard et chaos* (Ruelle [1988]) ; Pierre Bergé, Yves Pomeau et Charles Vidal, *L'ordre dans le chaos. Vers une approche déterministe de la turbulence* (Bergé, Pomeau et Vidal [1988]), etc. ; et les études

Le rapprochement que nous avons risqué plus haut, entre la solidarité causale de tous les événements de l'Univers telle que d'Alembert l'énonçait au XVIII^e siècle (dans l'article « Fortuit ») et l'« effet papillon » des conceptions du chaos déterministe qui rend impossible à terme toute prévision, par exemple en météorologie, est en fait très significatif de ce que l'*absence de prévision* possible, qui devrait apparaître comme une sorte d'indétermination, est dû en fait, en quelque sorte, à un « déterminisme absolu », si la cohérence du vocabulaire permettait ici une telle expression, que nous allons devoir aussitôt corriger. Le battement d'ailes imperceptible, qui nous échappe, engendre des effets qui seront perçus quelque temps plus tard, très loin de là, en raison de la solidarité des causalités. Cependant, puisque ce sont les conditions initiales qui ne nous sont, en fin de compte, pas exactement connues, nous n'étions pas dans une situation de déterminisme au sens propre. Ce que la très grande généralité de situations d'amplification arbitraire de très petites variations des conditions initiales indique, en réalité, c'est le caractère généralement inopérant de l'idéal déterministe. De tels systèmes restent cependant gouvernés par l'enchaînement des causalités, qui est pris souvent, mais à tort, pour le déterminisme.

Ces systèmes physiques, dits « déterministes », ne sont, en réalité, que des systèmes causals, et ce qui les structure, c'est précisément le système de leurs équations différentielles, transcription de cette causalité physique. Au lieu de continuer à parler, à leur propos, de *systèmes déterministes non prévisibles*, il vaudrait sans doute mieux dire : *systèmes causals au sens classique et sensibles aux très petites variations des conditions initiales*. Autrement dit, l'« idéal déterministe », même pour les systèmes physiques, ou mécaniques, classiques, reste très éloigné de la réalité, et le « point de vue de la connaissance », anthropocentrique, qu'il représente, n'a qu'une prise limitée sur la nécessité de la nature. Sa capacité de *prévisions* est souvent dérisoire au regard des informations que ces systèmes recèlent. L'étude de tels systèmes peut, en vérité, apporter des connaissances bien plus riches si l'on ne se laisse pas enfermer dans les limitations d'une pensée du déterminisme, et si l'on pense plus largement les *prédictions* d'une autre nature permises par les relations causales. Par exemple, comme Poincaré en eut l'idée le premier, en s'intéressant au comportement général (« qualitatif ») des solutions, ou au comportement de familles de trajectoires au lieu d'une seule, ou encore, comme les connaissances plus récentes l'ont fait voir, aux « attracteurs étranges » qui signent les propriétés structurelles de tels systèmes physiques dans le cas des systèmes dissipatifs.

5. LA PHYSIQUE QUANTIQUE, OU LA CRITIQUE DE LA CAUSALITE DIFFERENTIELLE ET LA LIMITATION DU DETERMINISME

La physique quantique a été l'occasion de la critique la plus vive faite à l'encontre non seulement du déterminisme, mais aussi de la causalité. C'est, en fait, la causalité classique qui a la première montré ses insuffisances dans le domaine des phénomènes quantiques, en raison des actions discontinues

suivantes : Sara Franceschelli, *Construction de signification physique dans le métier de physicien : le cas du chaos déterministe* (Franceschelli, [2001]) ; S. Franceschelli, M. Paty et T. Roque (éds.), *Epistémologie des systèmes dynamiques* (Franceschelli, Paty et Roque [à paraître]).

introduites par le quantum d'action de Planck. Dès 1906, Einstein avait fait le constat que la théorie électromagnétique classique était insuffisante pour les phénomènes atomiques et radiatifs, c'est-à-dire quantiques. Constat confirmé par Paul Ehrenfest en 1911, et Poincaré, en se penchant sur la question à la fin de la même année, fut amené au diagnostic sans appel que, dans ce domaine, la physique ne se laissait plus décrire par des équations différentielles. L'irréductibilité du quantum d'action, difficilement acceptée par les physiciens, et par Max Planck lui-même, demandait un autre mode de description théorique que celui des actions continues et de la causalité différentielle.

Dès 1913, en proposant son modèle théorique de l'atome nucléaire aux niveaux d'énergie quantifiés, Niels Bohr s'engageait sur la voie d'une approche « semi-classique », qui combinait l'utilisation de la théorie classique dans certaines conditions et la règle de quantification des énergies discontinues pour les niveaux de l'atome nucléaire, cette dernière permettant de rendre compte de l'émission et de l'absorption de rayonnement (selon la loi de Planck et d'Einstein, $\Delta E = h\nu$). Le « principe de correspondance » effectuait le raccord du nouveau modèle et de l'ancienne théorie, aux limites de son application possible, qui définissaient la frontière du nouveau domaine. La physique de l'atome et du rayonnement devait « renoncer au mode de description causal », selon les mots ultérieurs de Bohr, c'est-à-dire à se représenter les niveaux énergétiques des atomes en termes de trajectoires orbitales des électrons autour des noyaux, du moins dès qu'il y avait passage d'une orbite à une autre. Le modèle de l'atome de Bohr était dual : il admettait la description classique pour les états stationnaires, avec conservation d'énergie, la description spatio-temporelle des orbites électroniques gardant alors son sens ; mais il la rejetait pour les transitions entre états, qui n'étaient plus descriptibles dans l'espace en termes de changement (continu) de trajectoire. Cette dualité lui apparaîtrait plus tard, avec la mécanique quantique, comme un trait général de la possibilité de se représenter les phénomènes quantiques, dont il élaborait les attendus sous forme d'une doctrine ou philosophie de la « *complémentarité* ». Les deux descriptions étaient mutuellement incompatibles, mais elles permettaient, si on les appliquait successivement, de rendre compte des phénomènes quantiques³⁸.

Quant au déterminisme au sens classique, il apparut assez tôt également qu'il était difficile de le maintenir, non pas seulement à cause de la rupture de causalité, mais pour le rôle différent qu'étaient amenées à jouer les probabilités dans ce domaine. Jusqu'alors, les probabilités avaient servi de simple palliatifs de l'ignorance où l'on était, par exemple, des processus individuels avec la mécanique statistique, mais le déterminisme de principe n'était pas affecté, et l'on parlait de « déterminisme statistique ». Or il apparaissait de plus en plus, pour les phénomènes quantiques, que les probabilités étaient un « moyen indispensable de la description », et que l'on ne pouvait s'en passer même idéalement. Un diagnostic très lucide avait été établi dans ce sens par Paul Langevin, dès 1913³⁹. Par ailleurs Ladislas Natanson, en 1911, et Paul et Tatiana

³⁸ Niels Bohr, *Atomic theory and the description of nature* (Bohr [1929]) ; *Physique atomique et connaissance humaine* (Bohr [1957]).

³⁹ Paul Langevin, « La physique du discontinu », in Langevin [1923]. Voir M. Paty, « Poincaré, Langevin et Einstein » (Paty [2002]).

Ehrenfest peu de temps après, s'étaient rendus compte que la statistique correspondant à la loi de Planck du rayonnement du corps noir était différente de celle utilisée avec des distributions de probabilités ordinaires (elle utilisait des combinaisons et non des arrangements d'éléments, comme si ces éléments n'avaient pas d'identité propre). A la fin de 1916, en proposant son essai de synthèse théorique cohérente des processus quantiques, connue depuis comme la « première théorie des quanta », qui établissait en particulier les propriétés corpusculaires du rayonnement lumineux, juxtaposées à ses propriétés ondulatoires, Einstein fut amené à constater la permanence du caractère probabiliste des prédictions de sa théorie.

Loin de s'atténuer avec les progrès théoriques, ce caractère probabiliste des phénomènes quantiques ne fit que se voir renforcé, au point de constituer le soubassement même de la nouvelle théorie « véritablement quantique », la mécanique quantique, qui se présenta et s'imposa dès 1926-1927⁴⁰. La nature particulière des probabilités quantiques, déjà indiquée auparavant, fut précisée en 1924-1926 par Sathandra Nath Bose et Albert Einstein (pour les « bosons », à fonction symétrique d'échange par permutation) et par Wolfgang Pauli, Enrico Fermi et Paul A. M. Dirac (pour les « fermions », à fonction antisymétrique d'échange par permutation). Elle fut rapportée à une « indiscernabilité » fondamentale (« ontologique », si l'on veut) des particules ou systèmes quantiques identiques. L'interprétation probabiliste de la fonction d'onde (ou fonction d'état), proposée par Max Born en 1926, était l'une des pierres d'angle de la théorie, car elle raccordait les *grandeurs théoriques*, de forme mathématique, utilisées pour la description du système physique, et conçues comme abstraites et indirectes, et les *grandeurs observées* (mesurées) dans les phénomènes. Ces grandeurs, liées entre elles par l'équation d'état du système, étaient la fonction d'état, représentée par un vecteur d'un espace de Hilbert, ψ , et les variables dynamiques, représentées par des opérateurs linéaires agissant sur la fonction d'état. Le « principe de superposition » stipule (conformément aux propriétés des espaces de Hilbert), que toute superposition linéaire des solutions (ψ_i) de l'équation est aussi une solution possible, en sorte que la fonction d'état la plus générale solution de l'équation d'état est une superposition linéaire de l'ensemble des fonctions propres, chacune étant affectée d'un coefficient, α_i , égal à sa probabilité correspondante ($\psi = \sum_i \alpha_i \psi_i$).

L'interprétation de Born stipulait que le module carré de la fonction d'état (soit $|\psi_i|^2$, ψ_i étant l'une des solutions possibles, pour les « valeurs propres » λ_i des opérateurs A représentant les variables dynamiques) donne la probabilité pour que le système se trouve dans l'état S_i considéré ($\alpha_i = |\psi_i|^2$).

Les phénomènes quantiques avaient désormais une théorie prédictive pour les décrire, la mécanique quantique. Cependant, la signification physique des grandeurs théoriques ne paraissait pas évidente, et suscitait des interprétations

⁴⁰ Voir sa présentation au monde scientifique par ses divers fondateurs au Conseil de physique Solvay de 1927, sur « *Electrons et photons* » (Institut Solvay [1928]). On considère ici indistinctement les deux versions de la nouvelle théorie qu'étaient la mécanique ondulatoire et la mécanique quantique.

diverses, dont nous ne pouvons faire le tour ici. Ces interprétations n'étaient pas seulement « physiques », en termes de *signification physique des grandeurs* du « formalisme théorique ». Elles se voulaient aussi philosophiques, en termes de conceptions générales sur la connaissance. L'interprétation la plus courante pendant plusieurs décennies fut celle dite « de Copenhague », formulée par Bohr autour de la doctrine de la complémentarité. L'idée directrice de Bohr était que nous ne pouvons connaître les phénomènes quantiques que par l'intermédiaire des appareils d'observation qui, étant macroscopiques (pour parvenir à notre perception), obéissent à la physique classique. Mais comme les concepts classiques sont insuffisants pour décrire exactement les phénomènes quantiques, en raison de leurs limitations, on doit faire appel aux informations alternatives de descriptions complémentaires (celles de l'onde et de la particule, celle de la position et de l'impulsion, etc.). Dans ces conditions, il subsistait un problème pour la causalité : l'équation d'onde de la théorie est bien différentielle et causale, mais elle porte sur des opérateurs, et non plus sur de simples fonctions à valeurs numériques ; la détermination physique du système au moment de son observation était acausale, car la mesure choisit de manière discontinue une seule des fonctions propres dont la fonction d'état théorique est la superposition linéaire : elle correspond à une transition brutale, aléatoire $\psi \rightarrow \psi_i$.

Quant au déterminisme, le caractère probabiliste lui était opposé, suivant un glissement de sens par rapport à la définition usuelle telle que nous l'avons considérée plus haut. La mécanique quantique ne pouvait se satisfaire, quelle que soit l'interprétation qu'on lui adjoigne, d'un déterminisme statistique, puisque les probabilités y sont irréductibles, au contraire de la mécanique statistique. La question de fond était celle de la possibilité ou non de décrire des événements ou des systèmes physiques individuels à partir d'une formulation probabiliste. Il faudrait alors distinguer la probabilité, comme forme théorique, et les statistiques, comme résultat expérimental (une distinction que quasiment personne ne faisait à l'époque du vif débat sur l'interprétation). Mais dès lors, il ne s'agissait plus tant de *déterminisme*, que de la nature de la *réalité physique*, comme cela ressortait du débat entre Bohr et Einstein. Pour Bohr, il était impossible de concevoir l'objet indépendamment du sujet ; la causalité et le déterminisme perdaient, en fait, d'emblée leur sens en l'absence de séparation objet-sujet, séparation qu'Einstein désirait au contraire maintenir. Bohr proposait de « renoncer à [la] représentation intuitive » des phénomènes atomiques, de « renoncer définitivement à l'idéal de causalité » et de « modifier de fond en comble notre attitude à l'égard du problème de la réalité physique ».⁴¹ Einstein indiquait, quant à lui, face aux phénomènes complexes de la mécanique quantique, qu'il faudrait « élargir et raffiner encore notre concept de causalité »⁴².

On parlait donc de crise de la causalité, à cause de la « réduction du paquet d'onde », ou de la « projection » de la fonction d'onde sur une seule de ses composantes. On parlait aussi de « crise du déterminisme », à cause du spectre de probabilités attaché à toute grandeur physique, et de sa raison profonde, du point

⁴¹ Niels Bohr, dans son article « Discussion avec Einstein sur les problèmes épistémologiques de la physique contemporaine » (Bohr [1949]).

⁴² A. Einstein dans « Epilogue : a socratic dialogue », *op. cit.* (Einstein & Murphy [1932]).

de vue théorique, qui tenait au caractère non-commutable des grandeurs dynamiques, et dont les relations d'indétermination de Heisenberg étaient la conséquence. C'est ainsi que Max Born affirmait avec force que le déterminisme, c'est-à-dire la possibilité de déterminer d'avance les événements futurs, est une affirmation vide de sens. Il en expliquait la raison en ces termes : « Pour qu'elle eût un sens, il faudrait que nous fussions capables de connaître complètement le présent, ce qui est exclu. » Il rapportait, en effet, implicitement, la connaissance du présent en question, à celle des variables conjuguées (ou incompatibles), qui ne peuvent être connues simultanément à cause de leurs relations de non-commutation, et qui font que l'« état propre » de l'une ne peut être un « état propre » de l'autre. Les valeurs attribuées à ces variables comme solutions de l'équation d'état sont soumises aux inégalités de Heisenberg, parfois appelées relations d'incertitude ou d'indétermination.⁴³ Pour remédier à l'indétermination probabiliste, des physiciens (Louis de Broglie, David Bohm, Jean-Pierre Vigiér et d'autres) proposèrent d'ajouter des variables cachées déterministes, mais nous ne pouvons aborder ici cette question⁴⁴.

L'idée exprimée par Born en se reportant à la *connaissance* possible est formulée en termes de *mesure* par d'autres auteurs, comme Paulette Février, philosophe : une théorie physique est dite déterministe ou indéterministe, expose-t-elle, si, à partir de résultats de mesures initiales il est possible, ou non, « de prévoir avec certitude le résultat de n'importe quelle mesure ultérieure »⁴⁵. Cette formulation a le mérite de rappeler que c'est bien de variables conformes à la mesure qu'il est question dans le problème du déterminisme tel qu'il était posé. On se demande, rétrospectivement, si les grandeurs qui portent les contenus physiques les plus significatifs sont bien les grandeurs observables, de nature nécessairement classique, ou si ce ne pourrait être, au contraire, les grandeurs « mathématiques » de la théorie, qui contiennent tous les caractères adéquats à la description des phénomènes spécifiquement quantiques. La connaissance n'est pas donnée seulement dans la perception, elle se tient surtout dans l'entendement. Ici aussi, les caractères structurels de la théorie s'avèrent les plus riches pour la prédiction, mais aussi pour la compréhension⁴⁶. Et si, plus profondément qu'une crise du déterminisme, l'on s'était trouvé devant une crise de nos représentations ? Doit-on nécessairement passer par des grandeurs classiques pour décrire des systèmes quantiques ? ou bien une intelligibilité de ces derniers n'est-elle pas désormais possible directement à partir des grandeurs abstraites de la théorie et de leurs propriétés relationnelles, si appropriées pour penser les phénomènes quantiques et agir sur eux ?

Paul Langevin écrivait, dans les années 1930 : « Ce dont il s'agit, en réalité, ce n'est pas du tout d'une crise du déterminisme, mais bien d'une crise du

⁴³ Max Born, dans *L'Europe et le monde d'aujourd'hui*, La Baconnière, Neuchâtel, 1958, p. 200. Voir aussi la correspondance entre Max Born et Albert Einstein (Einstein et Born [1969]).

⁴⁴ Voir, par exemple, M. Paty, « Sur les variables cachées de la mécanique quantique: Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie » (Paty [1993b]).

⁴⁵ Paulette Février, *L'état actuel du déterminisme et de l'indéterminisme dans les sciences*, [Février [1952]].

⁴⁶ Voir M. Paty, « La notion de grandeur et la légitimité de la mathématisation en physique » (Paty [2001]) ; *L'Intelligibilité du domaine quantique* (Paty [à paraître, b]).

mécanisme que nous essayons d'utiliser pour représenter un domaine nouveau. » « Nous constatons en fait », ajoutait-il, « l'insuffisance, dans le microscopique, des notions et des idées qui avaient réussi dans le macroscopique, qui avaient été créées à son usage et à son contact prolongé par tant de générations »⁴⁷. Et encore : « Plutôt que de conclure à l'absence de déterminisme dans la nature, il est plus simple de dire : c'est que la question est mal posée, et que la nature ne connaît pas de mobile corpusculaire ». « Dans cet emploi du mot corpuscule, lourd de vieilles hérédités, il y a quelquefois une source de confusions et de difficultés », notait encore Langevin, qui réfutait l'idée d'une incertitude dans les lois de la nature, et concluait des résultats de la physique quantique qu'« il n'y a rien dans le domaine de l'atome, cet infiniment petit, qui corresponde à la notion d'objet individualisable que la mécanique classique a introduite »⁴⁸. Langevin critiquait le déterminisme corpusculaire, mécaniste, c'est-à-dire laplacien, pour mieux préserver un « déterminisme » entendu dans le sens large que nous avons rencontré par exemple chez Poincaré.

Mais ce qui apparaît clairement avec la physique quantique, c'est le lien que la notion de déterminisme entretient avec la représentation attachée à un système de concepts, en l'occurrence le système des concepts classiques, et même mécaniques : la physique quantique est, pour cette raison, indéterministe. Et pourtant, nous savons aujourd'hui que rien en physique n'est plus *déterminé* (ou enserré théoriquement) que les propriétés prédites par la théorie quantique, à partir de la fonction d'état ψ , qui est « complètement déterminée » par l'équation d'état, laquelle est pleinement *causale* au sens propre, c'est-à-dire exprimée par une équation différentielle. Le seul problème est celui, épistémologique, de la *signification physique* de cette fonction d'état et des variables dynamiques qui lui sont associées, qui ont la forme d'opérateurs, et non celles de valeurs numériques.

6. CONCLUSION. L'EXIGENCE DE *NECESSITE*.

Il nous faut maintenant conclure en quelques mots, bien que le parcours que nous venons de faire, en tentant d'éclairer la genèse, les transformations de sens et les problèmes posés par des notions générale comme celles de causalité et déterminisme à propos de la physique, se suffise à lui-même.

Nous avons vu la causalité physique se proposer pour accompagner et justifier le point de vue des concepts appropriés aux phénomènes de mouvement et de changement : toute la physique s'est constituée sur la base de cette notion, en choisissant en référence à elle les principes et les concepts propres à sa mathématisation, et cette notion elle-même s'est, en retour, adaptée à ces nouvelles exigences. A y regarder de près, la physique quantique a poursuivi sur cette lancée, en faisant passer la causalité du côté de ses grandeurs structurelles (fonctions d'état et opérateurs), qui portent le contenu physique fondamental, celui qui fait la spécificité des phénomènes et des systèmes quantiques. Cette causalité élargie s'exprime dans les relations entre les grandeurs dynamiques, qui peuvent

⁴⁷ P. Langevin, *La notion de corpuscule et d'atome* (Langevin [1934]), p. 35.

⁴⁸ P. Langevin, « Les courants positiviste et réaliste dans la philosophie de la physique » (Langevin [1938]), p. 1. Voir M. Paty, *La matière dérobée* (Paty [1988a]), p. 209.

être temporelles (on parlera de causalité proprement dite), ou être indépendantes du temps comme variable explicite, par exemple dans les relations d'invariance ou de symétrie (on parlera alors plutôt de relation fonctionnelle ou structurelle) : mais on ne voit pas de différence de nature entre les deux. La causalité au sens de l'évolution avec le temps des grandeurs de la physique classique apparaît comme un cas particulier de la seconde, toujours utile dans les situations traditionnelles (trajectoires simples, etc.).

En ce qui concerne le déterminisme, nous l'avons vu se cristalliser, puis se relativiser, en perdant la précision initiale qui avait fait sa fortune, nommément parce qu'il était trop lié à un point de vue particulier de la connaissance, en dépendance étroite d'un système de concepts fondé sur des représentations classiques, et peu propre à s'affranchir de celles-ci. Il est difficile de maintenir l'idée d'un déterminisme absolu qui continuerait d'être attaché à un point de vue conceptuel particulier. Il est, certes, possible d'en maintenir l'exigence, mais elle se vide de sens, et ne correspond plus à une prise effective de la connaissance⁴⁹.

Nous avons vu, dans les conceptions qui ont posé ces notions ou les ont critiquées, se profiler souvent, mais rarement de manière explicite, la notion de *nécessité*. Au contraire du déterminisme, qui exprime une exigence à partir d'un point de vue, la nécessité ne peut être un point de vue, puisqu'elle est l'immanence même de la nature, et ne peut donc qu'être plus difficile à formuler. Elle ne relèverait pas d'un point de vue, mais d'une exigence : une exigence de la nature réfléchie dans notre entendement, et donc portant ses effets dans les représentations, avec la possibilité de transformer et de remplacer ces dernières par d'autres. La *nécessité* est, comme le réel, une catégorie hypothétique et programmatique, celle d'un ordre des phénomènes et de la nature qui produit des contraintes sur nos manières d'appréhender ces derniers par nos concepts et relations de concepts (grandeurs et équations). L'attention à la nécessité de la nature est ce qui a fait le mouvement de la science et, par exemple, qui a imposé la causalité physique (et celle de la nature), et ses transformations. On a pu la confondre avec le déterminisme, comme Claude Bernard ou Henri Poincaré ; mais des savants l'ont expressément revendiquée, d'Albert Einstein à Jacques Monod. Elle peut être aussi refusée, au nom d'une impossibilité de parler en s'affranchissant d'un point de vue particulier ou en prétendant tenir l'ensemble de tous les points de vue possibles.

Pourtant, bien des indications provenant de la physique, et notamment de ses nouvelles directions, qu'il s'agisse de la relativité ou de la physique quantique, semblent mettre fortement en avant cette exigence, pour formuler les théories physiques, de se placer *du point de vue de tous les points de vue possibles*, si l'on songe à la signification des principes et des propriétés d'invariance et de symétrie.

Le point de vue de la *critique* des catégories qui semblaient bien établies et absolues, telles que la causalité ou le déterminisme, ou encore

⁴⁹ Les arguments de Karl Popper dans son ouvrage *L'Univers irrésolu. Plaidoyer pour l'indéterminisme* (Popper [1982], rédigé en 1956), vont pour une part dans le même sens que ceux esquissés ici, mais prêtent souvent à discussion. Nous ne pouvons les commenter dans le cadre de cette étude.

l'objectivité, ou une notion étroite de la réalité, s'est imposé, montrant le lien que ces notions méta-théoriques entretiennent avec les systèmes de concepts et de représentations, et leur caractère relatif par rapport à ces derniers. Cette critique a été tenue au nom de la *nécessité* des phénomènes, qui semble bien s'imposer comme l'instance à laquelle référer nos connaissances, quels que soient par ailleurs nos choix préférentiels d'interprétations. Dès lors, la critique des conceptions étroites ou caduques et l'exigence de la nécessité des phénomènes ou du réel devraient avoir pour effet de remettre ces notions « sur leurs pieds », en faisant considérer les concepts théoriques intelligibles appropriés aux situations nouvelles.

Dans cette perspective, les notions méta-théoriques ou catégories qui paraissent les plus appropriées au programme de la physique actuellement en devenir sont celles d'*interdépendance fonctionnelle* (comme extension de la causalité) et de *nécessité*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALEMBERT, Jean le Rond D' [1743]. *Traité de dynamique*, David, Paris, 1743. 2ème éd., modif. et augm., David, Paris, 1758.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1749]. *Recherches sur la précession des équinoxes et sur la nutation de l'axe de la Terre dans le système newtonien*, David, Paris, 1749.

ALEMBERT, Jean le Rond D' [1751]. *Discours préliminaire de l'Encyclopédie*, 1751. Nlle éd., introduite et annoté par Michel Malherbe, Vrin, Paris, 2000.

ALEMBERT, Jean le Rond D' [1754-1756]. *Recherches sur différents points importants du système du monde*, 3 vols., Paris, 1754-1756.

ALEMBERT, Jean le Rond D' [1755]. « Elémens des Sciences », *Encyclopédie*, vol.5, 1755, p. 491-497.

ALEMBERT, Jean le Rond D' [1757]. « Fortuit », *Encyclopédie*, vol. 7, 1757.

ALEMBERT, Jean le Rond D' [1767]. « Doutes et questions sur les probabilités », in J. d'A., *Mélanges de littérature, d'histoire et de philosophie*, Chatelain, Amsterdam, 1767, vol. 5, p. 273 - 304 ; in d'Alembert [1821], vol 1, p. 451-462.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1821]. *Œuvres philosophiques, historiques et littéraires*, 5 vols., Belin, Paris, 1821 ; ré-éd., Slatkine Reprints, Genève, 1967.

ALEMBERT, Jean le Rond D', et DIDEROT, Denis (éd.) [1751-1780]. *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, 17 vols + 11 vol. de planches, Briasson, David, Le Breton et Durant, Paris, 1751-1780. (mentionné comme : *Encyclopédie*).

BERGE, Pierre, POMEAU, Yves & VIDAL, Charles [1988], *L'ordre dans le chaos. Vers une approche déterministe de la turbulence*, Préface de David Ruelle, Hermann, Paris, 1988.

BERNARD, Claude [1865]. *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Baillière, Paris, 1865.

BERNARD, Claude [1879-1885]. *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*, Baillière, Paris, 2 vols., 1879-1885.

BERNARD, Claude [1890]. *La science expérimentale*, Baillière, Paris, 1890.

BIRKHOFF, George D. [1912]. Quelques théorèmes sur le mouvement des systèmes dynamiques, *Bulletin de la Société mathématique de France*, 40, 1912, 305 suiv.

BOHR, Niels [1929]. *Atomic theory and the description of nature*, Trad. du danois, Cambridge University Press, Cambridge, 1934 ; re-ed., 1961.

BOHR, Niels [1949]. Discussion avec Einstein sur les problèmes épistémologiques de la physique contemporaine, in P. A. Schilpp (ed.), *Albert Einstein, philosopher- scientist*, The library of living philosophers, Open Court, La Salle (Ill.), 1949 : repr. dans Bohr [1957].

BOHR, Niels [1957]. *Physique atomique et connaissance humaine* (trad. du danois par E. Bauer et R. Omnès), Gauthier-Villars, Paris, 1961.

BORN, Max [1958]. *L'Europe et le monde d'aujourd'hui*, La Baconnière, Neuchâtel, 1958.

DAHAN-DALMELICO, Amy, CHABERT, Jean-Louis & CHEMLA, Karine (éds.) [1992]. *Chaos et déterminisme*, Seuil, Paris, 1992.

DEBRU, Claude [2003]. Causalité, temporalité, fonction. Kant, Helmholtz, Mach, in Viennot, Laurence et Debru, Claude (éds.), *Enquête sur le concept de causalité*, Collection « Sciences, histoire et société », Presses Universitaires de France, Paris, 2003 (dans ce volume).

DUHEM, Pierre [1906]. *La théorie physique. Son objet, sa structure*, Paris, 1906 ; Ré-éd., Vrin, Paris, 1981.

EDDINGTON, Arthur [1939]. *The philosophy of physical science*, Cambridge University Press, Cambridge 1939.

EINSTEIN, Albert [1927]. Newtons Mechanik und ihr Einfluss auf die Gestaltung der theoretischen Physik, *Naturwissenschaften* 15, 273-276 ; trad. fr., La mécanique de Newton et son influence sur l'évolution de la physique théorique, in A. Einstein, *Œuvres choisies : Science, éthique, philosophie*, éd. par J. Merleau-Ponty et F. Balibar, Seuil, Paris, vol. 5, 1991, p.235-241.

EINSTEIN, Albert [1946]. Autobiographisches. Autobiographical notes, in Schilpp, P.A. (ed), *Albert Einstein, philosopher-scientist*, The library of living philosophers, Open Court, La Salle (Ill.), 1949, p. 1- 95.

EINSTEIN, Albert [1949]. Reply to criticism. Remarks concerning the essays brought together in this cooperative volume, in Schilpp, P.A. (ed), *Albert Einstein, philosopher-scientist*, The library of living philosophers, Open Court, La Salle (Ill.), 1949, p. 663-693.

EINSTEIN, Albert and MURPHY, James [1932]. Epilogue : a socratic dialogue, in Planck, Max, *Where is science going?*, Norton, New York, 1932.

EINSTEIN, Albert und BORN, Max [1969]. *Briefwechsel 1916-1955*, Nymphenburger Verlagshandlung, München, 1969. Trad. fr. par Pierre Leccia, *Correspondance 1916-1955, commentée par Max Born*, Seuil, Paris, 1972.

FEVRIER, Paulette [1952]. *L'état actuel du déterminisme et de l'indéterminisme dans les sciences*, Presses Universitaires de France, Paris, 1952.

FOULQUIE, Paul [1962]. *Dictionnaire de la langue philosophique*, avec la collaboration de Raymond Saint-Jean, Presses Universitaires de France, Paris, 1962.

FRANCESCHELLI, Sara [2001]. *Construction de signification physique dans le métier de physicien : le cas du chaos déterministe*, Thèse, Université Paris 7 Denis Diderot, Paris, 2001.

FRANCESCHELLI, Sara ; PATY, Michel et ROQUE, Tatiana (eds.) [2002]. *Epistémologie des systèmes dynamiques*, Actes des Journées tenues à Paris en nov. 1999, à paraître.

HADAMARD, Jacques [1898]. Les surfaces à courbures opposées et leurs lignes géodésiques, *Journal de mathématiques pures et appliquées*, 5^e série, t. 4, p. 27 et suiv.

INSTITUT SOLVAY [1928]. *Electrons et photons. Rapports et discussions du cinquième Conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927 sous les auspices de l'Institut international de physique Solvay*, Gauthier-Villars, Paris, 1928.

KANT, Emmanuel [1755]. *Histoire générale de la nature et théorie du ciel ou Essai sur la constitution et l'origine mécanique de l'Univers dans sa totalité traité d'après les principes de Newton*, Trad., introd. et notes par Pierre Kersberg, Anne-Marie Roviello et Jean Seidengart, Vrin, Paris, 1984. (Original en allemand : *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*, Petersen, Königsberg et Leipzig, 1755).

LALANDE, André [1926]1980. *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*, Presses Universitaires de France, Paris, 1926 (2^e éd., la première ayant paru en fascicules de 1902 à 1923) ; 13^e éd., 1980.

LANGEVIN, Paul [1911a]. L'évolution de l'espace et du temps, Conférence au Congrès de philosophie de Bologne, *Scientia*, 1911, in Langevin [1923], p. 265-300.

LANGEVIN, Paul [1911b]. Le temps, l'espace et la causalité dans la physique moderne, Communication du 19 octobre 1911, *Bulletin de la Société Française de Philosophie*, 12, 1911-1912, 1-46 ; également in Langevin [1923], p. 301-344.

LANGEVIN, Paul [1913]. La physique du discontinu, Conférence faite à la Société française de Physique le 27 novembre 1913, in Langevin [1923], p. 189-264.

LANGEVIN, Paul [1923]. *La physique depuis vingt ans*, Douin, Paris, 1923.

LANGEVIN, Paul [1934]. *La notion de corpuscules et d'atomes*, Hermann, Paris, 1934.

LANGEVIN, Paul [1938]. Les courants positiviste et réaliste dans la philosophie de la physique (Rapport à la réunion de l'Union Internationale de Physique, le 2 juin 1938 à Varsovie), in Collectif, *Les Nouvelles Théories de la Physique*, Paris, 1939, p. 231-254.

LAPLACE, Pierre Simon [1774]. Mémoire sur les probabilités des causes par les événements (1774), in P.S.L., *Œuvres complètes*, vol.. 8, 1891, p. 27-65 ; et édition 1986 de Laplace [1814].

LAPLACE, Pierre Simon [1796]. *Exposition du système du monde*, Paris, 1796; 6^e ré-éd. rev. et augm., 1824.

LAPLACE, Pierre Simon [1799-1825]. *Traité de mécanique céleste*, 5 vols., Paris, 1799-1825. Rééd. en 4 vols., Paris, 1829-1939.

LAPLACE, Pierre Simon [1812]. *Théorie analytique des probabilités*, 1^è éd. 1812 ; 2^e éd., 1814.

LAPLACE, Pierre Simon [1814]. *Essai philosophique sur les probabilités* parue comme introduction à la 2^e éd. de la *Théorie analytique...*, 1814 (réimpression, Culture et Civilisation, Bruxelles, 1967) ; rééd. modifiées jusqu'en 1825. Nlle éd., augm. de mémoires, préface de René Thom, postface de Bernard Bru, Bourgois, Paris, 1986.

LAPLACE, Pierre Simon [1878-1912]. *Oeuvres complètes*, Gauthier-Villars, 14 vols, Paris, 1878-1912.

LEIBNIZ, Gottfried Wilhem [1705]. *Nouveaux essais sur l'entendement humain* (rédigé en 1704-1705, éd. posth., 1765) ; éd. par J. Brunschvicg, Garnier-Flammarion, Paris, 1966.

LEIBNIZ, Gottfried Wilhem [1710]. *Essais de Théodicée* (1710), éd. par Jacques Jalabert, Aubier-Montaigne, Paris, 1962.

LORENZ, Edward [1993]. *The essence of chaos*, University College Press, London, 1993 ; 2nd impression, 1995.

MACH, Ernst [1883]. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig, 1883. Trad. fr. (sur la 4^e éd. allemande) par E. Bertrand, *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, Hermann, Paris, 1904; ré-éd., 1923.

MERLEAU-PONTY, Jacques [1983]. *La science de l'Univers à l'âge du positivisme. Etude sur les origines de la cosmologie contemporaine*, Vrin, Paris, 1983.

MERLEAU-PONTY, Jacques [2003]. *Sur la science cosmologique. Conditions de possibilité et problèmes philosophiques*, Collection « Penser avec les sciences », EDP-Sciences, Paris, 2003.

MORELLET, Abbé [1756]. Fatalité, in d'Alembert et Diderot [1751-1780], *Encyclopédie*, vol. 6, 1756, p. 422-429.

NEEDHAM, Joseph [1969]. *The Great Titration*, 1969 ; trad. fr. par Eugène Jacob, *La science chinoise et l'Occident (Le Grand Titrage)*, Seuil, Paris, 1973.

PATY, Michel [1988a]. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Archives contemporaines, Paris, 1988.

PATY, Michel [1988b]. D'Alembert et les probabilités, in Rashed, Roshdi (ed.), *Sciences à l'époque de la Révolution française. Recherches historiques*, Blanchard, Paris, 1988, p. 203-265.

PATY, Michel [1988c]. Sur la notion de complétude d'une théorie physique, in Fleury, Norbert; Joffily; Sergio; Martins Simões, J.A. and Troper, A. (eds), *Leite Lopes Festschrift. A pioneer physicist in the third world* (dedicated to J. Leite Lopes on the occasion of his seventieth birthday), World scientific publishers, Singapore, 1988, p. 143-164.

PATY, Michel [1992]. L'endoréférence d'une science formalisée de la nature, in Dilworth, Craig (ed.), *Intelligibility in science*, Rodopi, Amsterdam, 1992, p. 73-110.

PATY, Michel [1993a]. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.

PATY, Michel [1993b]. Sur les variables cachées de la mécanique quantique: Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie, *La Pensée* (Paris), n°292, mars-avril 1993, 93-116.

PATY, Michel [1994]. Sur l'histoire du problème du temps : le temps physique et les phénomènes, in Klein, Etienne et Spiro, Michel (éds.), *Le temps et sa flèche*, Editions Frontières, Gif-sur-Yvette, 1994, p. 21-58; 2è éd., 1995; Collection Champs, Flammarion, Paris, 1996, p. 21-58.

PATY, Michel [1999c]. Paul Langevin (1872-1946), la relativité et les quanta, *Bulletin de la Société Française de Physique*, n° 119, mai 1999, 15-20.

PATY, Michel [2001]. La notion de grandeur et la légitimité de la mathématisation en physique, in Espinoza, Miguel (éd.), *De la science à la philosophie. Hommage à Jean Largeault*, L'Harmattan, Paris, 2001, p. 247-286.

PATY, Michel [2002]. Poincaré, Langevin, Einstein, *Epistémologiques. Philosophie, sciences, histoire. Philosophy, science, history* (Paris, São Paulo) 2, n°1-2, janvier-juin 2002, 33-73 (in Bensaude-Vincent, Bernadette ; Bustamante, Martha-Cecilia ; Freire, Olival & Paty, Michel (éds.), *Paul Langevin, son œuvre et sa pensée. Science et engagement*, numéro spécial).

PATY, Michel [2004]. Genèse de la causalité physique, *Revue philosophique de Louvain*, 2004, sous presse.

PATY, Michel [à paraître, a]. *Einstein, les quanta et le réel*, à paraître.

PATY, Michel [à paraître, b]. *L'Intelligibilité du domaine quantique*, à paraître.

PATY, Michel [à paraître, c]. L'élément différentiel de temps et la causalité physique dans la dynamique de Alembert, in Allard, André & Morelon, Régis, *et al.* (eds.), *Livre de Mélanges en hommage à Roshdi Rashed*, à paraître.

POINCARÉ, Henri [1881-1886]. Mémoires sur les courbes définies par une équation différentielle, *Journal de mathématiques pures et appliquées* : 1è partie : 3è série t. 7, 1881, 375-422 ; 2è partie : t. 8, 1882, 251-296 ; 3è partie : 4è série, t. 1, 1885, 167-244 ; 4è partie : t. 2, 1886, 151-217 ; repris in H.P., *Oeuvres*, tome 1, respectivement : p. 3-44, 44-84, 90-158, 167-222. Egaleme nt : *Mémoires sur les courbes définies par une équation différentielle et autres textes (1881-1886), suivi de mémoires par Charles Briot et Jean-Claude Bouquet (1856)*, réimpression des mémoires originaux, Gabay, Paris, 1993.

POINCARÉ, Henri [1890]. Sur les problèmes des trois corps et les équations de la dynamique, *Acta mathematica*, 13, 1890, 1-270 ; repris dans Poincaré [1913-1965].

POINCARÉ, Henri [1892-1899]. *Les méthodes mathématiques de la mécanique céleste*, Gauthier-Villars, Paris, 3 vols., 1892-1899.

POINCARÉ, Henri [1905]. *La valeur de la science*, Flammarion, Paris, 1905 ; 1970.

POINCARÉ, Henri [1911]. *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*, professées à la Sorbonne, rédigées par Henri Vergne, Hermann, Paris, 1911.

POINCARÉ, Henri [1913]. *Dernières pensées*, Flammarion, Paris, 1913.

POINCARÉ, Henri [1913-1965]. *Oeuvres*, Gauthier-Villars, Paris, 11 vols., 1913-1965.

POPPER, Karl [1982]. *The Open Universe (The Postscript to the Logic of Scientific Discovery, 2)*, Hutchinson, London, 1982 (rédigé en 1956) ; trad. fr. par Renée Bouveresse, *L'Univers irrésolu. Plaidoyer pour l'indéterminisme*, Hermann, Paris, 1984.

ROQUE, Tatiana [2001]. *Ensaio sobre a gênese das idéias matemáticas: exemplos da Teoria dos Sistemas Dinâmicos*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

RUELLE, David [1988]. *Hasard et chaos*, Odile Jacob, Paris, 1988. Trad. angl., *Chance and chaos*, Princeton University Press, Princeton, 1991.

RUELLE, David & TAKENS, Floris [1971]. On the nature of turbulence, *Communications in Mathematical Physics* 20, 1971, 167-192.